



かし、ラマン増幅によって伝送損失を補償する分布定数型の光増幅器として構成することができ。また、EDF Aなどと同様、光伝送路上で中継局内などの所定位置に設置し、入力信号光を所定の利得 (net gain) で光増幅して出力信号光を得る集中定数型の光増幅器として利用することも可能である。

【0006】しかしながら、ラマン増幅器を集中定数型として利用する場合、EDF Aなどに比べて、光増幅に必要なラマン増幅用光ファイバの長さが長い。また、自己位相変調や四光波混合などの非線型光学効果の影響が大きくなる。このため、ラマン増幅用光ファイバでの非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が顕著となるといえる問題が生じる。

【0007】本発明は、以上の問題点を鑑みてなされたものであり、非線型光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制される集中定数型のラマン増幅器、及びそれを用いた光伝送システムを提供することを目的とする。

【0008】

【課題を解決するための手段】このような目的を達成するために、本発明によるラマン増幅器は、(1)所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅する集中定数型のラマン増幅器であって、(2)ラマン増幅器に接続され、増幅波長帯域内にある信号光をそれにラマン増幅するとともに、互いに異なる波長分散値を有する複数のラマン増幅用光ファイバと、(3)複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれに励起光を供給する1または複数の励起光供給手段と、を備えることを特徴とする。

【0009】単一のラマン増幅用光ファイバを用いて構成された集中定数型のラマン増幅器においては、その構成から増幅器モジュール内で波長分散を制御することができない。したがって、ラマン増幅用光ファイバの波長分散の値により、ラマン増幅用光ファイバを伝送される間に信号光に累積される波長分散が大きくなったり、あるいは、零分散に近い状態で信号光がラマン増幅用光ファイバを伝送されるなどの伝送条件を生じる場合がある。

【0010】このとき、信号光の分散値が大きくなる場合には、自己位相変調 (SPM: Self Phase Modulation) や群速度分散 (GVD: Group Velocity Dispersion) などが発生する原因となる。また、信号光が零分散近傍で伝送される場合には、交差位相変調 (XPM: Cross Phase Modulation) や四光波混合 (FWM: Four Wave Mixing) などが発生する原因となる。そして、ラマン増幅用光ファイバでの伝送中にこれらの非線型光学効果等が生じると、その影響によって信号光の伝送品質が劣化してしまう。

【0011】これに対して、上記したラマン増幅器においては、直列に接続した複数のラマン増幅用光ファイバを用いて集中定数型のラマン増幅器を構成するとともに

に、それらの波長分散値をそれぞれ異なる値としている。これによって、増幅器内の光伝送路で波長分散を制御して、信号光への分散の累積や零分散近傍での伝送を低減することが可能となる。したがって、非線型光学効果による増幅器内での信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器が実現される。

【0012】また、増幅波長帯域内の少なくとも一部の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 $5.0 \text{ ps/nm}$ 以下であることを特徴とする。

【0013】あるいは、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から出力端まで累積した分散値の絶対値が、 $5.0 \text{ ps/nm}$ 以下であることを特徴とする。

【0014】ラマン増幅器内の光伝送路全体としての累積された分散値を、ラマン増幅用光ファイバの波長分散によって、それぞれ波長分散値の異なる複数のラマン増幅用光ファイバが接続された光ファイバ伝送路の全体として、波長分散が充分に補償された構成とすることができ、したがって、SPMやGVDの発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0015】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバでの波長分散値を入力端から任意の位置まで累積した分散値の絶対値が、各位置に対して  $30 \text{ ps/nm}$ 以下であることが好ましい。

【0016】ラマン増幅器内の光伝送路全体としての分散値が上記のように補償されている場合においても、入力端から出力端までの光伝送路上で分散値が適度に大きくなることがあると、SPMやGVDによる信号光の伝送品質の劣化の原因となる。これに対して、光伝送路上の各位置に対して、その位置までに累積された分散値を常に上記の範囲内とすることによって、そのような伝送品質の劣化を抑制することができ。

【0017】さらに、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれにおける分散スロープ値が、 $-0.5 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以上  $0.1 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 以下であることが好ましい。このように、分散スロープ値を充分小さく値としておけば、増幅波長帯域の全体に対して、充分に波長分散を補償することが可能となる。

【0018】また、複数のラマン増幅用光ファイバは、互いに異なる符号の波長分散値を有する2つのラマン増幅用光ファイバを少なくとも含むことを特徴とする。

【0019】このように逆符号の波長分散値を有するラマン増幅用光ファイバを用いれば、波長分散値の絶対値がある程度大きくまであっても、逆符号の波長分散値の組合せによって全体として波長分散を補償することができ。これによって、信号光の零分散近傍での伝送を極

力遅延することが可能となり、XPMやFWMの発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

【0020】具体的な構成としては、例えば、複数のラマン増幅用光ファイバは、2つのラマン増幅用光ファイバからなるとともに、その一方の波長分散値が正、他方の波長分散値が負に構成されているものがある。このよ

うな構成によれば、特に簡単なラマン増幅用光ファイバの構成によって波長分散を補償して、信号光の伝送品質の劣化の抑制を実現することができ。

【0021】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれでの波長分散値の絶対値が、所定の波長分散下限値以上であることを特徴とする。このように波長分散値に下限値を与えることによって、零分散近傍の波長分散値を有する光ファイバを除いて、増幅器内の光伝送路における零分散近傍での信号光の伝送を防止することができる。波長分散下限値については、例えば、絶対値が  $0.5 \text{ ps/nm}$ 以上とすることが好ましい。

【0022】また、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれは、互いに異なるレイリー散乱係数を有することと特徴とする。このように、複数のラマン増幅用光ファイバを、上記したように互いに異なる波長分散値を有すると同時に、レイリー散乱係数についても異なる値を有するものとすることによって、増幅器での伝送品質の劣化の抑制とともに、その雑音特性をも向上することができ。

【0023】このとき、複数のラマン増幅用光ファイバのうち、最も小さいレイリー散乱係数を有するラマン増幅用光ファイバが、最も入力端側の位置に設置されていることが好ましい。

【0024】入力端側にレイリー散乱係数が大きいまいラマン増幅用光ファイバを設置する構成とした場合、入力端側で二重レイリー散乱によって生じる雑音光が大きくなることも、その大きい雑音光が後段の他のラマン増幅用光ファイバによって光増幅されることとなる。これに

対して、レイリー散乱係数が小さく雑音特性が優れた光ファイバを入力端側に設置する構成とすることによっ

て、増幅器内の光伝送路全体としての雑音特性を向上することができ。

【0025】また、複数のラマン増幅用光ファイバのそれぞれが、 $5 \text{ km}$ 以下であることが好ましい。このように、ラマン増幅用光ファイバの長さを極力短くす

る。また、ラマン増幅器1内での光伝送路 (光ファイバ線路) が形成されている。また、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれでの波長分散値の組合せによって、ラマン増幅される信号光への分散の累積や信号光の零分散近傍での伝送を低減するなど、所定の条件を満たすように、ラマン増幅器1内の光伝送路での波長分散が制御さ

ファイバが、励起光供給手段から励起光が供給される位置に最も近い位置に設置されていることを特徴とする。

【0028】ラマン増幅用光ファイバの実効断面面積、非線型定数、またはその両者にそれぞれ上記した条件を適用することによって、誘導ラマン散乱によるラマン増幅の効率を高めて、増幅器のラマン利得を向上することができ。また、ラマン増幅器の全体として必要なラマン利得を確保するためのラマン増幅用光ファイバの長さが短くなるなど、ラマン増幅用光ファイバで生じる雑音光や伝送品質の劣化を低減することが可能となる。

【0029】また、本発明による光伝送システムは、信号光が伝送される光ファイバを用いて構成された光伝送路を有するとともに、光伝送路を伝送される信号光を中継する中継局内に、上記したラマン増幅器が設置されていることを特徴とする。

【0030】光伝送システムの中継局に設置される集中定数型の光増幅器として、上記の構成を有するラマン増幅器を用いることによって、信号光の伝送品質の劣化が抑制されて、送信局から受信局へと確実に信号光を伝送可能な光伝送システムを実現することができる。

【0031】

【発明の実施の形態】以下、図面とともに本発明によるラマン増幅器及びそれを用いた光伝送システムの好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものとは必ずしも一致していない。

【0032】図1は、本発明によるラマン増幅器の概略的形態を示す構成図である。本ラマン増幅器1は、光伝送システムの中継局などに設置される集中定数型の光増幅器であり、2つのラマン増幅用光ファイバ11、12と、2つの励起光源ユニット21、22とを備えて構成されている。

【0033】ラマン増幅用光ファイバ11と12とはそれぞれ、互いに異なる波長分散値を有する石英系の光ファイバからなる。また、これらのラマン増幅用光ファイバは、ラマン増幅器1の入力端1aから出力端1bに向けて、ラマン増幅用光ファイバ11、12の順で直列に接続されている。

【0034】この2つのラマン増幅用光ファイバ11、12を用いた構成によって、信号光を伝送するときにも、励起光が供給されているときに、所定の増幅波長帯域内にある信号光を励起光によってラマン増幅するため

のラマン増幅器1内での光伝送路 (光ファイバ線路) が形成されている。また、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれでの波長分散値の組合せによって、ラマン増幅される信号光への分散の累積や信号光の零分散近傍での伝送を低減するなど、所定の条件を満たすように、ラマン増幅器1内の光伝送路での波長分散が制御さ

7  
【0035】ラマン増幅用ファイバ11、12の端面には、それぞれ光アイソレータ41、42が設置されている。光アイソレータ41、42のそれぞれは、光を順方向（図1中に示した矢印の方向）へと通過させるが、逆方向へは通過させないものである。すなわち、光アイソレータ41は、ラマン増幅用ファイバ11から到達した光をラマン増幅用ファイバ12へと通過させるが、逆方向へは光を通過させない。また、光アイソレータ42は、ラマン増幅用ファイバ12から到達した光を出力端1bへと通過させるが、逆方向へは光を通過させない。

10  
【0036】ラマン増幅用ファイバ11、12への励起光は、励起光供給手段である励起光源ユニット21、22によってそれぞれ供給される。励起光源ユニット21、22は、ラマン増幅用ファイバ11、12と光アイソレータ41、42との間にそれぞれ設けられた光合波器31、32を介して、ラマン増幅器1内の光伝送路に接続されている。

20  
【0037】ここで、光合波器31、32は、励起光源ユニット21、22から供給されて到達した励起光を、前方のラマン増幅用ファイバ11、12へ向け逆方向にそれぞれ透過させる。また、ラマン増幅用ファイバ11、12から到達した信号光を、光アイソレータ41、42へ向け順方向にそれぞれ透過させる。これによって、本ラマン増幅器1は、後方励起（逆方向励起）の光増幅器として構成されている。

30  
【0038】図1において、ラマン増幅用ファイバ11へと励起光を供給する励起光源ユニット21について、その具体的な構成の一例を示してある。本実施形態においては、6つの励起光源211a、211b、212a、212b、213a、及び213bが用いられている。なお、励起光源ユニット22については、その具体的な構成の図示を省略しているが、励起光源ユニット21と同様の構成のものを用いられている。

40  
【0039】励起光源ユニット21の6つの励起光源のうち、励起光源211a及び211bは同一の波長 $\lambda_1$ の光を出力するものである。励起光源211a及び211bからの光は、偏波合成器211cによって合成されて、偏波について均一な波長 $\lambda_1$ の励起光が生成される。同様に、励起光源212a及び212bは同一の波長 $\lambda_2$ （ $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ）の光を出力し、それらは偏波合成器212cによって合成されて、偏波について均一な波長 $\lambda_2$ の励起光が生成される。また、励起光源213a及び213bは同一の波長 $\lambda_3$ （ $\lambda_1 \neq \lambda_3$ 、 $\lambda_2 \neq \lambda_3$ ）の光を出力し、それらは偏波合成器213cによって合成されて、偏波について均一な波長 $\lambda_3$ の励起光が生成される。

50  
【0040】そして、偏波合成器211c、212c、及び213cでそれぞれ合成された波長 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、及び $\lambda_3$ の光は、波長合成器214において合成されて3つの発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

9  
【0046】また、増幅器1内の光伝送路での信号光の零分散近傍での伝送に関しては、2つのラマン増幅用ファイバ11、12は、互いに異なる符号の波長分散値（一方が正、他方が負の波長分散値）を有する構成とすることが好ましい。

10  
【0047】このように、逆符号の波長分散値を有するラマン増幅用ファイバ11、12を接続して光伝送路を構成すれば、ラマン増幅用ファイバ11、12での波長分散値の絶対値がそれぞれある程度の大きさの値であっても、逆符号の波長分散値の組合せによって、増幅器1内の光伝送路の全体として波長分散を補償することができる。これによって、信号光の零分散近傍での伝送を極力遅延することが可能となり、交差位相変調（XPM：Cross Phase Modulation）や四光波混合（FWM：Four Wave Mixing）の発生による信号光の伝送品質の劣化が抑制される。

20  
【0048】図1に示したラマン増幅器1におけるラマン増幅用ファイバの組合せ等について、さらに具体的に説明する。図2は、図1に示したラマン増幅器内の光ファイバ伝送路における波長分散の一例についての模式的な示すグラフである。なお、図2においては、ラマン増幅器1の構成を簡略化してラマン増幅用ファイバ11及び12のみを示し、励起光源ユニット21、22、光合波器31、32、及び光アイソレータ41、42については、図示を省略している。また、図中の点1cは、ラマン増幅用ファイバ11と12とが互いに接続される中間点を示している。

30  
【0049】図2に示した例においては、入力端1a側のラマン増幅用ファイバ11として、正の波長分散値を有する光ファイバが適用されている。これにより、入力端1aから中間点1cに向けて、伝送距離とともに分散値が累積的に増加し、中間点1cにおいて、約30 p s/nmの分散値となっている。

40  
【0050】一方、出力端1b側のラマン増幅用ファイバ12としては、負の波長分散値を有する光ファイバが適用されている。これにより、中間点1cで約30 p s/nmとなっていた分散値が、出力端1bに向けて伝送距離とともに累積的に減少し、出力端1bにおいてはほぼ0 p s/nmの分散値となる。より具体的には、その絶対値が所定の値以下（例えば0.5 p s/nm以下、あるいは5.0 p s/nm以下）の範囲内の分散値となるように波長分散が補償される。このような構成により、上記したように非線形光学効果による信号光の伝送品質の劣化が抑制されるラマン増幅器1が得られる。

50  
【0051】図3に、図2に示した構成のラマン増幅器を實現するためのラマン増幅用ファイバの具体例を、その屈折率プロファイルによって示す。図3に示した光ファイバは、SiO<sub>2</sub>にGeO<sub>2</sub>が添加された比屈折率 $\Delta n_1$ のコア領域61と、SiO<sub>2</sub>にGeO<sub>2</sub>が添加された比屈折率 $\Delta n_2$ のクラッド領域62とを有して構成されて

いる。  
【0052】上記した構成からなる光ファイバにおいて、純SiO<sub>2</sub>を0%としたコア領域61及びクラッド領域62の比屈折率差 $\Delta n_1 = 2.9\%$ 、 $\Delta n_2 = 0.4\%$ として、ラマン増幅用ファイバ11及び12がそれぞれ適用した。ここで、比屈折率差以外の光ファイバの構成については、それぞれの光ファイバで異なる構成とした。

10  
【0053】具体的には、前段のラマン増幅用光ファイバ11では、コア径を4.8 ( $\mu\text{m}$ )、波長1.55  $\mu\text{m}$ での波長分散を4.3 (p s/nm/km)、波長1.55  $\mu\text{m}$ での実効断面積を10.8 ( $\mu\text{m}^2$ )、非線形定数を20.4 (1/W/km)とした。

20  
【0054】また、後段のラマン増幅用光ファイバ12では、コア径を4.0 ( $\mu\text{m}$ )、波長1.55  $\mu\text{m}$ での波長分散を-9.0 (p s/nm/km)、波長1.55  $\mu\text{m}$ での実効断面積を9.9 ( $\mu\text{m}^2$ )、非線形定数を22.3 (1/W/km)とした。

30  
【0055】以上の構成からなるラマン増幅用光ファイバ11及び12を用いれば、図2に示した波長分散となるように、ラマン増幅器1を構成することができる。なお、それぞれの波長分散値から、中間点1cでの分散値が約30 p s/nmとなる。図2の場合には、ラマン増幅用ファイバ11の長さは約8.98 km、ラマン増幅用ファイバ12の長さは約3.93 kmとなる。

40  
【0056】ここで、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、波長分散を入力端1aから任意の位置まで累積した分散値の絶対値を、各位置に対して30 p s/nm以下の範囲内とすることが好ましい。これは、増幅器1内の光伝送路上の各位置での分散値の最大値を、図2に示した例のように、30 p s/nm以下とすることに対応する。

【0057】入力端1aから出力端1bまでの光伝送路上で分散値が過度に大きくなる位置が存在すると、光伝送路全体としての波長分散の補償にかかわらず、SPMやGVDによる信号光の伝送品質の劣化が発生する原因となる。これに対して、光伝送路上の各位置に対して分散値に一定の条件を課することによって、信号光の伝送中の伝送品質の劣化を抑制することができ、なお、この条件は、図1及び図2のように2つのラマン増幅用光ファイバ11、12を用いている場合には、それらが接続される中間点1cまでに累積される波長分散値を30 p s/nm以下とすることによって達成される。

【0058】また、ラマン増幅用光ファイバ11、12のそれぞれにおける分散スロープ値を、-0.5 p s/nm<sup>2</sup>/km以上0.1 p s/nm<sup>2</sup>/km以下の範囲内とすることが好ましい。

50  
【0059】例えば、上記した具体例の光ファイバ等によってラマン増幅器1を構成した場合、波長1.55  $\mu\text{m}$ で波長分散の補償が可能となるが、それぞれの分散ス

7)	12	特開 2002-40496	12	ロープ値の絶対値が大きいた、増幅波長帯域内で波長1.5μmから離れた波長帯域における波長分散の補償が困難となる。これに対して、上記のように分散スロープ値を充分に小さい値としておけば、増幅波長帯域の全体に対して、充分に波長分散を補償することが可能となる。
				【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
11	12	特開 2002-40496	12	【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
				【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
10	12	特開 2002-40496	12	【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
				【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
9)	13	特開 2002-40496	13	【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
				【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
8)	14	特開 2002-40496	14	【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。
				【0060】また、増幅波長帯域内の全体の波長帯域において、ラマン増幅用ファイバ11.1,12のそれぞれで波長分散値の絶対値を、所定の波長分散下限値以上として、0ps/nmが得られることと好ましい。

【図面の簡単な説明】

【図1】ラマン増幅器の一実施形態を示す構成図である。

【図2】図1に示したラマン増幅器内の光伝送路における波長分散の一例を示すグラフである。

【図3】ラマン増幅器に適用されるラマン増幅ファイバの構成を示す図である。

【図4】ラマン増幅ファイバにおけるラマン利得係数のグラフである。

【図5】図1に示したラマン増幅器を用いた光伝送システムの一実施形態を示す構成図である。

【図6】ラマン増幅器の他の実施形態を示す構成図である\*

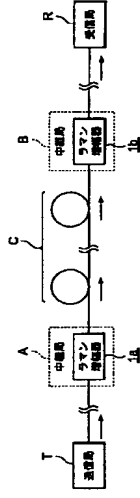
＊る。

【図7】ラマン増幅器の他の実施形態を示す構成図である。

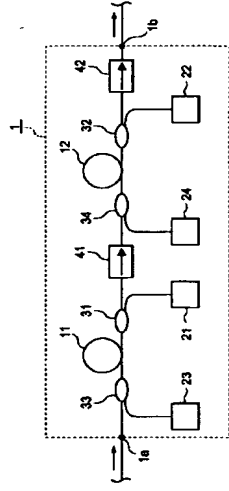
【図8】図1に示したラマン増幅器内の光伝送路における波長分散の他の例を示すグラフである。

【符号の説明】  
1…ラマン増幅器、1a…入力端、1b…出力端、1c  
…中間点、11、12…ラマン増幅用ファイバ、21  
…24…励起光源ユニット、31~34…光合波器、3  
5、36…光分波器、37…光伝送路、41、42…  
光アイソレータ。

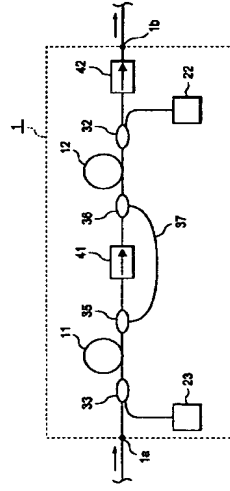
【図5】



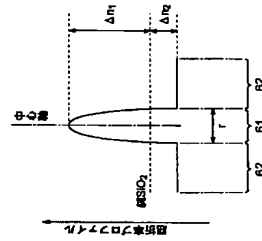
【図6】



【図7】



【図3】



【図4】

